

Cámara multispectral de infrarrojo medio para mediciones precisas de temperatura y densidad de columna en llamas

Juan Meléndez y Guillermo Guarnizo

LIR—Laboratorio Infrarrojo, Departamento de Física, Universidad Carlos III de Madrid, 28911 Leganés, España

RESUMEN

La medición precisa de la temperatura en llamas es un problema difícil que se ha conseguido abordar con éxito mediante imagen hiperspectral. Esta técnica es capaz de proporcionar mapas no solo de temperatura T (K) sino también de densidad de columna Q (ppm·m) de las principales especies químicas. Sin embargo, las aplicaciones industriales requieren instrumentación más barata y un análisis de datos más rápido y sencillo. En este trabajo se estudia el uso de imágenes multispectrales para la recuperación de T y Q_{CO_2} en llamas.

Los resultados hiperspectrales, basados en espectros de emisión con una resolución de $0,5\text{ cm}^{-1}$, resultaron ser muy precisos en trabajos anteriores y se han tomado como referencia para valorar las mediciones multispectrales de una cámara de infrarrojo medio ($3\text{ a }5\ \mu\text{m}$) con una rueda de seis filtros interferenciales. Se ha medido una llama estándar, con T y Q_{CO_2} conocidos, y una llama Bunsen ordinaria.

Para regiones con $T \approx 1300\text{ K}$, el promedio de errores relativos en medidas multispectrales es de $\sim 5\%$ para T (y puede reducirse a $\sim 2,5\%$ con una corrección basada en una regresión lineal) y $\sim 20\%$ para Q . Pueden obtenerse resultados similares con cuatro filtros para ambas variables, mientras que los resultados con dos filtros son también similares para T pero peores para Q .

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de combustión son de gran importancia en múltiples sectores industriales y la temperatura es el parámetro clave para su optimización. Sin embargo, los sensores intrusivos, como los termopares, perturban la llama y producen errores sistemáticos [1], mientras que los métodos láser son caros y difícilmente aplicables fuera del laboratorio. En el proyecto EMPRESS, dentro del programa EMPiR, se demostró, para una llama estándar desarrollada por el National Physical Laboratory (NPL), que la imagen hiperspectral proporcionaba mapas de T con errores en torno al 1% (es decir, $\Delta T \sim < 20\text{ K}$ para $T \sim 2000\text{ K}$) [2]. Este excelente resultado muestra la utilidad de la espectroscopia de emisión en el infrarrojo (IR), que permite además medir la densidad de columna Q (ppm·m) de las principales especies de la llama. El objetivo de este trabajo es estudiar la viabilidad de aplicar esta técnica con una cámara multispectral, lo que haría mucho más sencilla su aplicación en entornos industriales.

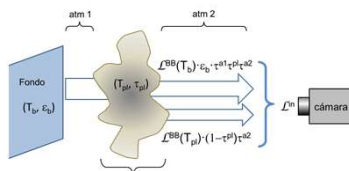


Figura 1: Esquema del modelo radiativo

2. PLANTEAMIENTO

La Figura 1 muestra un esquema del modelo radiativo para una medida típica. Despreciando la emisión de la atmósfera y la reflexión en el fondo, la radiación incidente en la cámara es la suma de los dos términos indicados.

El método hiperspectral [2,3] se basa en la comparación de los espectros experimentales de alta resolución ($0,5\text{ cm}^{-1}$) con simulaciones calculadas línea a línea usando los parámetros de la base de datos HITEMP2010 [4].

Los espectros simulados dependen de T y de Q_{CO_2} , y estos parámetros son variados iterativamente hasta encontrar un ajuste óptimo. Se obtienen así mapas de T y Q que proporcionan una gran información sobre la estructura de la llama.

La variación de temperatura y composición no altera sólo el espectro de emisión de un gas al nivel de su estructura fina, sino también la forma global de la banda de emisión, como muestra la Figura 2 (izquierda). Esto permite concebir la medida de temperatura a partir de una medida multispectral como la mostrada a la derecha.

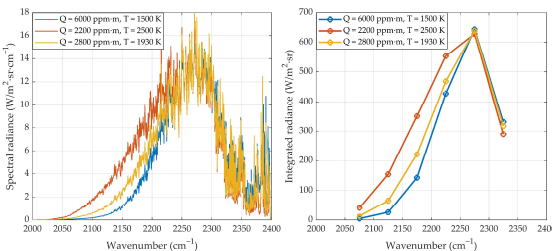


Figura 2. Izquierda: tres espectros de emisión simulados para diferentes densidades de columna Q de CO_2 y temperaturas de llama. Derecha: Radiancias integradas sobre bandas espectrales de 50 cm^{-1} de ancho para los mismos espectros de la izquierda.

La medida multispectral de temperaturas se ha planteado en 3 etapas:

1. Medida experimental: la cámara IR, dotada de 6 filtros interferenciales (Figura 3) se calibra radiométricamente contra un cuerpo negro, de modo que cada canal proporciona una medida de radiancia ($W/m^2 \cdot sr$). Esta se divide por la anchura del filtro para obtener una radiancia espectral ($W/m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1}$), asociada al nº de onda de centrado del filtro. A este vector de medida lo denominamos pseudoespectro.
2. Pre-cálculo de pseudoespectros simulados: para un intervalo de (T, Q_{CO_2}) que abarca los valores previsibles para la llama, se simulan los correspondientes pseudoespectros con el mismo procedimiento usado en las medidas hiperspectrales, más una integral en el intervalo del correspondiente filtro.
3. Para cada píxel, se hace una comparación exhaustiva del pseudoespectro experimental con los simulados, y se asigna la pareja (T, Q_{CO_2}) que proporciona mejor acuerdo.

El pre-cálculo de los pseudoespectros evita el cálculo iterativo para cada píxel, que es muy costoso computacionalmente, haciendo casi inmediato el proceso de recuperación, al coste del cálculo previo para una matriz de valores de (T, Q_{CO_2}) el intervalo entre sucesivos valores para el cálculo de hace en función del error esperado, valores típicos son $\Delta Q_{CO_2} = 20\text{ ppm}\cdot\text{m}$ y $\Delta T = 10\text{ K}$.

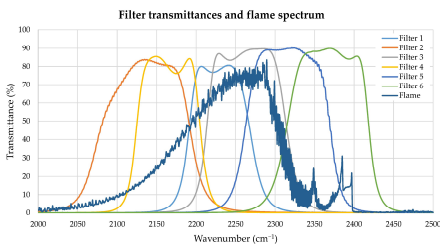


Figura 3: Transmisancia en la región IR media de los seis filtros de interferencia utilizados, con un espectro de emisión de la llama estándar (en unidades arbitrarias) mostrado para comparación.

3. RESULTADOS

Se midieron dos llamas: el quemador estándar de NPL y un quemador Bunsen de laboratorio.

Las medidas hiperspectrales se realizaron con un equipo Telops FIRST-MW operando entre 1850 cm^{-1} y 6600 cm^{-1} . Consta de un interferómetro de Michelson acoplado a una matriz de plano focal (FPA) de InSb, con 320×256 píxeles y una resolución máx. de $0,25\text{ cm}^{-1}$. Para reducir el tiempo de adquisición a ~ 2 o 3 min, los espectros se midieron a $0,5\text{ cm}^{-1}$ en una subventana de 160×256 píxeles.

Para las medidas multispectrales se usó una cámara Thermosensörk SME 640, que opera en la banda MIR ($3\text{ a }5\ \mu\text{m}$), con un detector FPA de 640×512 píxeles de InSb, enmarcado por ciclo Stirling.

La Figura 4 compara los resultados multispectrales e hiperspectrales para la llama estándar en el caso estequiométrico. Los valores son cualitativamente muy similares en la región de la llama, aunque muestran diferencias importantes donde los gases están más fríos. Esto es de esperar ya que los resultados no son fiables fuera de la zona central, porque la radiancia y, en consecuencia, la relación señal-ruido (SNR), disminuyen bruscamente fuera del área del quemador, lo que se traduce en estimaciones erróneas de T y Q .

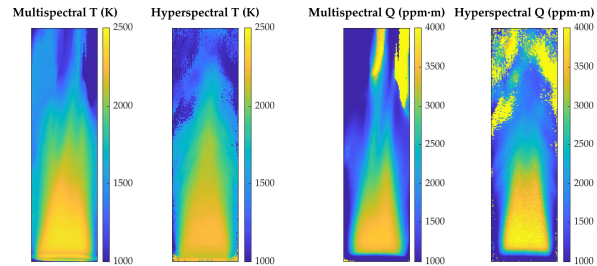


Figura 4: Mapas de temperatura y densidad de columna de CO_2 para la llama estándar estequiométrica obtenidos con el método multispectral y con el método hiperspectral.

Se puede realizar una comparación más detallada mediante un diagrama de dispersión (Figura 5), donde cada punto corresponde a un píxel. En las gráficas de la izquierda, se muestran todos los píxeles de la Fig. 4 y los valores son muy ruidosos para las regiones de señal pequeña. Sin embargo, si el gráfico se restringe a píxeles de regiones de mayor radiación, la correlación se vuelve mucho mejor. A modo de ejemplo, estableciendo un umbral para la radiancia espectral en el 3º filtro de $L_{3\mu} = 4\text{ W/m}^2 \cdot sr \cdot cm^{-1}$ se obtienen los diagramas de la derecha de la Figura 5. Ahora la correlación es mucho mejor, como lo indican los valores de R^2 que se muestran en el gráfico.

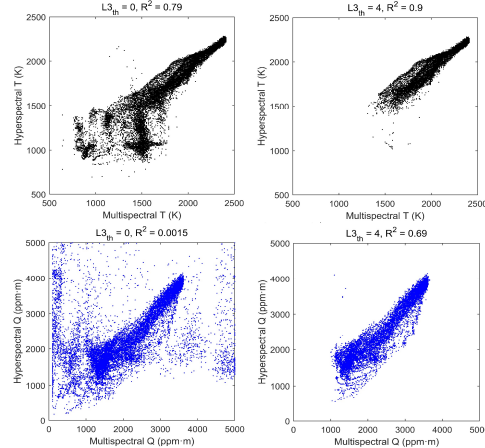


Figura 5: Diagramas de dispersión de valores recuperados hiperspectrales frente a multispectrales para T (fila superior) y Q (fila inferior) en el caso de la llama estándar en condiciones estequiométricas. Cada punto corresponde a un píxel, sin umbral de radiancia (columna izquierda) y con umbral $L_{3\mu} = 4\text{ W/m}^2 \cdot sr \cdot cm^{-1}$ (columna derecha).

El acuerdo entre los valores hiperspectrales y multispectrales se puede cuantificar mediante el promedio de errores relativos, definido para T como $(|T_H - T_M|/T_H)$, y análogamente para Q (Figura 6). Se puede mejorar la estimación usando una regresión lineal para predecir los valores hiperspectrales a partir de los multispectrales. El promedio de los residuos relativos, definido de manera análoga al error relativo promedio, se muestra también en la Figura 6.

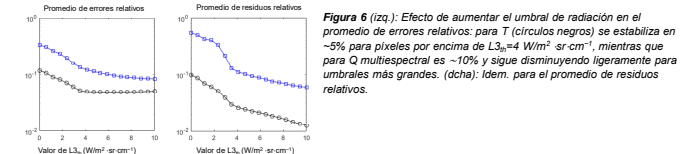


Figura 6 (izq.): Efecto de aumentar el umbral de radiación en el promedio de errores relativos: para T (círculos negros) se estabiliza en $\sim 5\%$ para píxeles por encima de $L_{3\mu} = 4\text{ W/m}^2 \cdot sr \cdot cm^{-1}$, mientras que para Q multispectral es $\sim 10\%$ y sigue disminuyendo ligeramente para umbrales más grandes. (dcha): ídem, para el promedio de residuos relativos.

La Figura 7 compara los mapas de T y Q_{CO_2} para la llama Bunsen. Los valores siguen siendo cualitativamente muy similares en la región de la llama, pero ahora hay muchos píxeles con valores anómalos en regiones más cercanas a la llama principal. Esto es de esperar, ya que los niveles de radiación son más pequeños que en la llama estándar, porque las temperaturas son más bajas pero también porque la llama es más delgada y las densidades de columna son considerablemente más pequeñas.

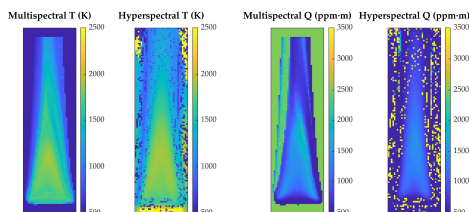


Figura 7: Mapas de temperatura y densidad de columna de CO_2 para la llama Bunsen obtenidos con el método multispectral y con el método hiperspectral.

REFERENCIAS

- [1] Meléndez, J.; Foronda, A.; Aranda, J.M.; López, F.; López del Cerro, F.J. Infrared thermography of solid surfaces in a fire. *Mes. Sci. Technol.* **2010**, *21*, 105504.
- [2] Sutton, G.; Fateev, A.; Rodríguez-Conejo, M.A.; Meléndez, J.; Guarnizo, G. Validation of Emission Spectroscopy Gas Temperature Measurements Using a Standard Flame Traceable to the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). *Int. J. Thermophys.* **2019**, *40*.
- [3] Meléndez, J.; Guarnizo, G. Multispectral Mid-Infrared Camera System for Accurate Stand-Off Temperature and Column Density Measurements on Flames. *Sensors* **2021**, *21*, 8395.
- [4] Rothman, L.S.; Gordon, I.E.; Barber, R.J.; Dothe, H.; Gamache, R.R.; Goldman, A.; Perevalov, V.I.; Tashkun, S.A.; Tennyson, J. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **2010**, *111*, 2139–2150.

4. CONCLUSIONES

En conclusión, para ambas llamas, en regiones con $T \approx 1300\text{ K}$, el promedio de errores relativos en medidas multispectrales es de $\sim 5\%$ para T y $\sim 20\%$ para Q . El promedio de residuos relativos para T es $\sim 2,5\%$, pero para Q no hay una reducción significativa.

Reducir a 4 el nº de filtros no deteriora apreciablemente los resultados. Incluso con dos filtros se obtienen errores similares para T pero claramente peores para Q .